Journal of Agricultural Economics and Development

Homepage: https://jead.um.ac.ir

Research Article
Vol. 37, No. 1, Spring 2023, p. 83-102

Proposing the Structure of a Multi-Objective Mathematical Programming Model with Water-Food-Energy Nexus Approach for Crop Production

E. Ahani[1], S. Ziaee[2], H. Mohammadi[3], M. Mardani Najafabadi[4]*, A. Mirzaei[5]

Received: 28-07-2022 Revised: 02-10-2022 Accepted: 11-10-2022 Available Online: 11-10-2022	**How to cite this article:** Ahani, E., Ziaee, S., Mohammadi, H., Mardani Najafabadi, M., & Mirzaei, A. (2023). Proposing the structure of a multi-objective mathematical programming model with water-food-energy nexus approach for crop production. *Journal of Agricultural Economics & Development 37*(1): 83-102. (In Persian with English abstract). http://doi.org/10.22067/jead.2022.77691.1147

Introduction

With the growing population of the world, water, food and energy supply will be one of the most important challenges ahead. Agriculture as the most important food producer is not only the consumer of water and energy, but also the most important supplier of energy. As a result, a balance must be struck between harvesting and exploitation of production resources and the amount of agricultural production. Due to the close relationship between water-food-energy systems and also their interaction with each other, a new concept called the “nexus” approach has been proposed which refers to the integrated nature and interactions of water-food-energy planning. This approach has provided suitable options for political decision makers, managers and planners in order to conserve existing resources and achieve sustainable development.

Material and Methods

In this study, we have tried to introduce a mathematical programming model using multi-objective mathematical programming (MOP) technique for water-food-energy nexus that has the ability to process managerial decisions. In this model, in addition to examining the economic aspect, the control of greenhouse gas emissions has also been investigated. The regions of Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz are the most important regions in the study area of Mashhad province in the production of crops. The data required for the study were collected through review of reports and agricultural statistical yearbooks of the year 2020-2021 and interviews with experts in each region and through consulting engineering companies. The hypothetical model under study includes lands covered by crops of Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz. In this model, the water needed to irrigate crops is supplied from surface and groundwater sources. Electricity (electricity consumption) is used to collect and pump of irrigation water, produce food, and supply the domestic and industrial sectors. In the process of generating electricity, production of food, irrigation of crops and consumption of fertilizers and pesticides, greenhouse gases are emitted, especially CO2. In this study, 6 objectives including: maximizing gross profit, maximizing the production of calories from food, minimizing emission of greenhouse gases, minimizing consumption of fertilizers and pesticides, minimizing consumption of irrigation water, and minimizing consumption of energy have been pursued.

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Associate Professor and Assistant Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, University of Zabol, Iran, respectively.
4 and 5- Associate Professor and Assistant Professor of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: m.mardani@asnrukh.ac.ir)
DOI: 10.22067/jead.2022.77691.1147

Results and Discussion

The results of the proposed model showed that the rate of change in the level of cultivation area in MOP compared to the current cultivation pattern in Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz decreased by 25.92%, 53.05% and 55.88%, respectively. The level of optimal cultivation for barley in Mashhad in order to maximize net profit objective increased by 16934 hectares (46.71%) and its maximizing caloric production equal to 8484 ha, which has decreased compared to the current pattern (22%). The cultivation area of barley in minimum irrigation water consumption decreased by 10877 hectares (1.11%) and in other minimization objectives it changed to 12892 hectares which increased by 17% in Mashhad region. Wheat, barley, alfalfa, corn, sugar beet, tomato and potato have the highest decrease in cultivation area in the MOP among crops. The total area of optimal cultivation in the net profit maximization model of Mashhad, Chenaran and Torqabeh-Shandiz equal to 48639, 26027 and 75 hectares, which showed an increase of 41.4%, 11.61% and 55.8%, respectively. Furthermore, in the model aimed at minimizing energy, irrigation water, fertilizer, pesticide consumption, and greenhouse gas emissions, the recommended cultivation areas are as follows: 25,475 hectares for energy consumption, 15,954 hectares for irrigation water consumption, and 100 hectares each for fertilizer consumption, pesticide consumption, and greenhouse gas emissions. These figures clearly indicate the need to reduce the cultivation area dedicated to agricultural products that have a significant environmental impact. Consequently, it is crucial to alter the cultivation pattern and adopt a strategy that focuses on producing crops with a lower environmental impact. By implementing this strategy, the objective is to cultivate crops that require less energy, irrigation water, fertilizer, and pesticides, while also minimizing greenhouse gas emissions. This approach aims to mitigate the environmental footprint associated with agricultural practices. By reducing the cultivation area for crops that have high environmental effects and transitioning towards crops that have a lesser impact on the environment, it is possible to achieve a more sustainable and environmentally friendly agricultural system.

Conclusion

The purpose of this study was to propose a nonlinear multi-objective mathematical programming model with water-food-energy nexus approach for crops in Mashhad province. In this study, in addition to economic relations, energy and environmental issues (greenhouse gas emissions) were also analyzed. The various components of the water-food-energy nexus, including energy supply planning, water supply and demand, food production, and control of greenhouse gas emissions, were modeled. The results showed that considering the MOP model based on economic and environmental objectives, the area under cultivation of wheat, barley, alfalfa, tomatoes, sugar beets and potatoes has significantly decreased. In other words, in order to achieve the objectives of maximum profit and minimum environmental impact, the area under wheat, barley, tomato, corn should be reduced and the area under cucumber, onion, potato and sugar beet should be increased. According to the results of this study, the following suggestions are presented:

- Implementation of the proposed optimal model of water-food-energy nexus allows farmers to simultaneously maintain economic income, environmental considerations, optimal and sustainable consumption of resources (water-food-energy) to select and consider suitable policies. So, it will only be a sustainable policy if it can be built within the combined framework of water, food, energy and the environment.
- In order to minimize the emission of greenhouse gases and its damage to the environment, the area under cultivation of agricultural products that have high environmental impact should be reduced, and in contrast to changes in cultivation pattern, the strategy to produce crops with less impact. Therefore, by developing a cropping pattern model, the productivity of the production capacities of the agricultural sector can be maximized and at the same time the damages and destructive consequences of crop production can be reduced.

Keywords: Agricultural planning, Multi-objective nonlinear programming, Water-food-energy nexus modeling

نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی
https://jead.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۷، شماره ۱، بهار ۱٤۰۲، ص. ۱۰۲-۸۳

پیشنهاد یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه با رویکرد همبست آب- غذا - انرژی برای تولید محصولات زراعی

الهه آهنی[۱]- سامان ضیائی[۲]- حمید محمدی[۳]- مصطفی مردانی نجف آبادی[٤*]- عباس میرزایی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

چکیده

با افزایش رشد جمعیت و تنوع رژیم‌های غذایی، تقاضای غذا و به دنبال آن تقاضای آب و انرژی برای تولید غذا دچار تغییر و تحول شده است. رویکرد همبست آب- غذا- انرژی یک چشم‌انداز کلی از پایداری است که تلاش می‌کند تا تعادل میان اهداف مختلف، منافع و نیازهای جوامع و محیط‌زیست را براساس کمی‌سازی روابط آب- غذا- انرژی از طریق مدل‌سازی‌های کیفی و کمی و همچنین پیشبرد تحقیقات برای مدل‌سازی یکپارچه و مدیریت برای ارائه استراتژی‌های مهم توسعه پایدار در جهان پویا و پیچیده امروز را برقرار سازد. لذا پژوهش حاضر با هدف جلوگیری از ارائه و اجرای سیاست‌های نامناسب و تک‌بعدی در تولید محصولات زراعی، به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه با استفاده از رویکرد همبست آب- غذا- انرژی پرداخته است. این مدل در محدوده مطالعاتی مشهد در استان خراسان رضوی بکار گرفته و اهداف متفاوتی از جمله حداکثرسازی سودکشاورزان و انرژی حاصل از تولید موادغذایی (کالری) و حداقل‌سازی مصرف کود و سم، انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، آب‌آبیاری برای سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در نظر گرفته شده است. با بکارگیری رویکرد همبست در انتخاب سطح زیرکشت محصولات زراعی محدوده مطالعاتی مشهد، سطح زیرکشت در الگوی بهینه ۴۸/۳۸ درصد، مصرف آب‌آبیاری ۲۵ درصد، انرژی ۵۳/۱۱ درصد و میزان تولید کالری محصولات ۳۳ درصد، مقدار مصرف سم و کود ۳۸/۳ درصد، هزینه‌های تولید ۶۰/۸ درصد، انتشار گازهای گلخانه‌ای ۴۰ درصد، مصرف سوخت دیزل ۳۸/۴ درصد و تولید کل ۳۳ درصد در الگوی چندهدفه برای محدوده مطالعاتی مشهد کاهش و سود خالص کشاورزان ۴۹/۳ درصد افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هرچند با در نظر گرفتن یک حوزه از حوزه‌های آب- غذا- انرژی بصورت مجزا اثرات تک‌بعدی هر یک از سیاست‌ها در بخش‌کشاورزی منعکس می‌شود، اما با استناد به تنها یک حوزه نمی‌توان در مورد اثربخشی سایر سیاست‌ها تصمیم‌گیری قطعی نمود. در مجموع در راستای تأمین امنیت‌غذایی با استفاده از همبست آب- غذا- انرژی بایستی مناطق مناسب برای کشت محصولات خاص در محدوده مطالعاتی مشهد شناسایی شود. در نهایت الگوهای کشت بهینه پیشنهادی که بر مبنای مدیریت صحیح منابع آب، انرژی، افزایش راندمان اقتصادی محصولات کشاورزی و حفاظت زیست‌محیطی تهیه شده به طور کامل اجرا شود.

طبقه‌بندی JEL: C02, C61, O13.
واژه‌های کلیدی: برنامه زراعی، برنامه‌ریزی غیرخطی چند هدفه، مدل‌سازی همبست آب- غذا- انرژی

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه زابل
۴ و ۵- به ترتیب دانشیار و استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
(*- نویسنده مسئول: Email: m.mardani@asnrukh.ac.ir)

DOI: 10.22067/jead.2022.77691.1147

مقدمه

با افزایش رشد جمعیت و تنوع رژیم‌های غذایی، تقاضای غذا و به دنبال آن تقاضای آب و انرژی برای تولید غذا دچار تغییر و تحول شده است. آب، غذا و انرژی عناصر اصلی و ضروری نیازهای بشر هستند و ارتباط پیچیده و بدون حد و مرز میان این سه سامانه بیان‌گر وابستگی و اثرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر در چرخه تولید است. در سراسر جهان آب، غذا و انرژی منابع حیاتی مهمی برای تأمین نیازهای اقتصادی- اجتماعی و رسیدن به توسعه پایدار اقتصادی هستند. این منابع به‌طور جدایی‌ناپذیری با یکدیگر در ارتباط اند، به‌طوری‌که هر یک از این منابع وابستگی قابل توجهی نسبت به یکدیگر دارند. کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین بخش تولیدکننده موادغذایی نه‌تنها مصرف‌کننده آب (۹۰ درصد مصرف جهانی آب شیرین) و انرژی (۳۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان) است، بلکه مهم‌ترین عرضه‌کننده انرژی نیز محسوب می‌شود (Bagheri, 2018). در فرآیند تولید غذا به منابع آب و انرژی، برای تولید انرژی به آب و برای دسترسی به آب به انرژی نیاز است، همچنین از سامانه غذا برای تولید انرژی استفاده می‌شود. در نتیجه باید تعادل و توازنی بین جریان برداشت و بهره‌برداری از منابع تولید و میزان تولید محصولات کشاورزی ایجاد شود (Emamzadeh *et al*., 2016; Pu *et al*., 2022). با توجه به پیش‌بینی سازمان ملل متحد جمعیت کشورهای در حال توسعه از جمله ایران تا سال ۲۰۵۰ حدود ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت (Safaei *et al*., 2020). این افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضا برای موادغذایی و به موازات آن باعث افزایش تنش در منابع محدود آب و انرژی در مقیاس‌های مختلف منطقه‌ای خواهد شد. بنابراین برنامه‌ریزی مناسب و مصرف بهینه منابع محدود آب، انرژی و غذا برای تأمین نیازهای اجتماعی و اقتصادی یک جامعه در شرایط کنونی و آینده در راستای توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست مسئله‌ای چالش‌برانگیز است. علی‌رغم بحران‌های زیست‌محیطی و آبی که امنیت غذایی و انرژی کشور را تهدید کرده است؛ در صورتی‌که اقدام اساسی برای استفاده بهینه از منابع محدود آب در دستور کار قرار نگیرد، به‌طور قطع مشکل‌هایی برای دستیابی به توسعه پایدار کشور ایجاد خواهند شد (Davari *et al*., 2016).

شمال شرق کشور دارای مناطقی است که به شدت دچار فقر منابع آبی شده و از نظر صنعت، توسعه اقتصادی و انرژی نیز دچار محدودیت شده است. حوضه آبریز کشف‌رود و محدوده مطالعاتی مشهد بزرگترین و مهمترین زیرحوضه این رودخانه است، که در اثر محدودیت منابع آب سطحی، برداشت مازاد آب‌های زیرزمینی و افت شدید سطح آب و دیگر معضلات به وجود آمده در این حوضه، ادامه فعالیت در شرایط فعلی را برای کشاورزان و ساکنین منطقه ناممکن و آینده کشاورزان را به شدت تهدید می‌کند. عدم دسترسی محدوده مطالعاتی مشهد[1] به آب‌های سطحی سبب شده است که نیاز حقابه‌بران از طریق منابع آب زیرزمینی تأمین گردد. تولید غذا و انرژی در این محدوده علی‌رغم رفع نیاز جمعیت این دشت به خارج از حوضه نیز صادر می‌شود. این عمل وضعیت منابع آب این حوضه را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است. بنابراین به‌منظور مقابله با این شرایط و تأمین امنیت آب، غذا و انرژی برای ساکنان و کشاورزان این منطقه که یکی از بحرانی‌ترین حوضه‌های آبریز کشور می‌باشد مدلسازی روابط کمی ریاضی چند هدفه (MOP)[2] با استفاده همبست آب- غذا - انرژی (WEFN)[3] برای تولید محصولات زراعی امری ضروری بوده است.

آب، غذا و انرژی و امنیت هر سه سامانه بدون کاهش منابع طبیعی به‌عنوان یک چالش بزرگ در منطقه آسیا شناخته شده است. بدین‌جهت از سال ۲۰۱۵ به بعد سازمان ملل متحد مجموعه‌ای از اهداف توسعه پایدار مرسوم به (SDGs)[4] با هدف دستیابی به توسعه پایدار درازمدت جوامع انسانی و تضمین فراهمی آب، غذا و انرژی به‌منظور پایداری برای نسل‌های آینده در دستور کار خود قرار داد (Bagheri, 2018; Chai *et al*., 2020; Fabiani *et al*., 2020). با توجه به ارتباط نزدیک سامانه‌های آب- غذا- انرژی و همچنین تأثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر، مفهوم جدیدی به نام رویکرد پیوندی[5] یا رویکرد همبست مطرح شده است.

رویکرد هم بست آب ـ غذا ـ انرژی (WEFN) برای اولین بار در اجلاس بُن در سال ۲۰۱۱ در مجمع جهانی اقتصاد آلمان با هدف مواجهه با مشکلاتی از جمله کمبود منابع، ارائه شد. این رویکرد تلاش می‌کند تا با ارائه چارچوبی شفاف، هوشمند و منطقی، جوانب مختلف ارتباط میان این سه حوزه را بررسی نماید تا با انجام تحلیلی یکپارچه، درک بهتری از کنش و واکنش‌های موجود میان محیط زیست و فعالیت‌های انسانی فراهم آورد (Hoff, 2011). دستیابی به چنین ادراکی، با شناسایی ارتباط میان منابع موجود در این حوزه‌ها، منجر به

۱- محدوده مطالعاتی مشهد قسمتی مرکزی و وسیع واقع در بخش میانه حوضه آبریز کشف رود می‌باشد که بخشی از شهرستان‌های طرقبه- شاندیز، چناران و مشهد را شامل می‌شود (شکل ۱).

2- Multi Objective Programming
3- Water Food Energy Nexues
4- Sustainable development goals
5- Nexus

اتخاذ برنامه‌ها، تصمیم‌گیری‌ها و سیاست‌های جامع‌تر و امنیت آب، غذا و انرژی در نهایت توسعه کشور به سمت رفع موانع و مشکلات پیش‌رو و برقرای پایداری بلندمدت را به‌دنبال دارد (Fabiani et al., 2020; Bagheri, 2018). از مهمترین مزایای این رویکرد به بهبود بهره‌وری استفاده از منابع و دوری از اثرات نامطلوب سیاست‌های توسعه‌ای تک‌بخشی نیز اشاره شده است. عدم هماهنگی و تعامل ضعیف میان بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی باعث بهره‌برداری ناپایدار از سایر منابع از جمله آب، انرژی، زمین شده است و در نتیجه تهدیدی برای امنیت آب و غذا و رسیدن به اهداف توسعه پایدار خواهد بود. بنابراین با تأکید بر یک سیاست در مدیریت هر یک از منابع به‌تنهایی، باعث ایجاد بروز مسائل مختلف در سایر منابع خواهد بود (Kalbali et al., 2021).

افزایش کارایی استفاده از منابع و کاهش خطرات محیط‌زیستی و تخریب اکولوژیکی نیازمند مدیریت جامع و مشترک این منابع با استفاده از رویکرد همبست می‌باشد (Karabulut et al., 2018; Safaei et al., 2020). بعبارتی بکارگیری رویکرد همبست می‌تواند (Mirabi and Karabi, 2018) راهکارهای مناسب برای تصمیم‌گیران سیاسی، مدیران و برنامه‌ریزان در جهت حفاظت از منابع موجود و دستیابی به توسعه پایدار ارائه دهد (Bagheri, 2018).

محققان بر این اعتقادند که بحران آب، انرژی و غذا در آینده ایران واقعی بوده و هشدار دهنده است، بدین منظور ایجاد یک شبکه پیوند برای ارائه دانش نوین برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری در بخش‌های آب، انرژی و غذا در کشور لازم بوده و زمینه را برای تبادل آرا و همفکری با کمک توسعه دانش فنی به‌ویژه در تعاملات گروداران و کنشگران فراهم می‌نماید (Safaei et al., 2020). بنابراین مطالعات معدودی در داخل و خارج در دهه‌های اخیر و تاکنون به بررسی همبست آب- غذا- انرژی از طریق مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی پرداخته‌اند.

از مهمترین این مطالعات می‌توان به مدل‌سازی رویکرد همبست آب- غذا- انرژی و میزان پایداری اجتماعی و محیط‌زیستی آن در شهرستان ورامین اشاره نمود (Safavi and Ehteshami., 2022). نتایج نشان داد مدیریت تلفیقی عرضه و تقاضا برای توسعه توأمان صنعت و کشاورزی نسبت به بهره‌گیری به شیوه مجزا بهتر توانسته اهداف توسعه را در پایدارترین حالت محقق نماید. در مطالعه کلبعلی و همکاران (Kalbali et al., 2021) یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی جهت مدیریت منابع آب و تخصیص سطح زیرکشت در حوضه آبریز قره‌سو توسعه داده شد. کیهان‌پور و همکاران (Keyhanpour et al., 2021) طی پژوهشی به تحلیل دینامیکی سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب مبتنی بر همبست منابع آب- غذا - انرژی با توجه به تغییرات تقاضای حاصل از رشد جمعیت و رشد اقتصادی در افق ۲۰ ساله با استفاده از رویکرد پویایی سیستم پرداخته‌اند. نتایج نشان داد شبیه‌سازی و ارائه راهکارهای پیشنهادی با استفاده از همبست منابع آب- غذا - انرژی بعنوان بهترین راهکار در یک سیستم ایده‌آل انتخاب شده است.

اسماعیل‌زاده و همکاران (Esmaeilzadeh et al., 2020) طی پژوهشی در استان کرمان اظهار داشتند که بیشتر تحلیل‌های اقتصادی تنها بر افزایش سود اقتصادی کشاورزان بدون توجه به پیامدهای زیست‌محیطی آن تمرکز دارند، بنابراین برای دستیابی به نتایج جامع‌تر بایستی مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی بطور همزمان اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی محصولات کشاورزی را در کنار سایر اهداف بصورت یکپارچه مورد بررسی قرار دادند. صفائی و همکاران (Safaei et al., 2020) رویکرد بهم‌پیوسته آب، انرژی و غذا در مدیریت منابع آب محدوده مشهد با استفاده از دو رویکرد همبست و غیر همبست مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که با مدیریت بهم‌پیوسته منابع آب و انرژی، وضعیت حوزه آبریز مشهد بسیار بحرانی‌تر از زمانی است که رویکرد همبست در نظر گرفته نشده باشد.

منعم و همکاران (Monem et al., 2019) روشی به‌منظور تجزیه و تحلیل رابطه آب، غذا و انرژی در زنجیره تولید محصول در شبکه‌های آبیاری زاینده‌رود استان اصفهان و ارزیابی کمی آن ارائه داده‌اند. نتایج نشان داد در نظر گرفتن همزمان پیوند آب، غذا و انرژی در تحلیل عملکرد شبکه‌های آبیاری و انتخاب سیاست‌های برتر امری ضروری است.

یو و همکاران (Yu et al., 2020) بهینه‌سازی مدیریت منابع آب کشاورزی در شرایط عدم‌قطعیت با استفاده از رویکرد همبست و از طریق مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی و چندهدفه انجام شد. مو و همکاران (Mo li et al., 2019) مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه (حداکثرسازی سود و حداقل انتشارگازهای گلخانه‌ای) را با استفاده از رویکرد همبست آب- غذا- انرژی در حوضه رودخانه گوادیانا (پرتغال و اسپانیا) بکار گرفتند. نتایج نشان داد مدلسازی همبست آب- غذا- انرژی در مناطقی که با کمبود منابع مواجه هستند قابل انجام است. نی و همکاران (Nie et al., 2019) تخصیص و بهینه‌سازی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی را تحت رویکرد همبست آب- غذا- انرژی از طریق مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی راهکاری جهت دستیابی به توسعه پایدار اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی معرفی کردند. ویکاکسونو و کانگ (Wicaksono and Kang, 2019) مطالعه‌ای را با موضوع شبیه‌سازی پیوند آب- غذا- انرژی در دو کشور کره جنوبی و اندونزی ثبت کردند. نتایج مطالعه در دو کشور نشان داد که مدل‌های شبیه‌سازی همبست می‌توانند امنیت منابع آب، غذا و انرژی را در شرایط آینده با قابلیت اطمینان بالایی بررسی کنند و مدیران می‌توانند از این ابزارها در تصمیم‌گیری‌های خود بهره‌مند شوند. ژانگ و وسلینو (Zhang and Vesselinov, 2018) کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی را در همبست آب- غذا- انرژی بهترین راه برای تخصیص منابع آب معرفی کردند.

بررسی‌های انجام شده در مرور منابع مشخص گردید که تاکنون پژوهشی در راستای رویکرد همبست آب- غذا - انرژی از طریق مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای تولید محصولات زراعی در داخل کشور صورت نگرفته است. لذا هدف از انجام این مطالعه پیشنهاد یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه با بکارگیری رویکرد همبست آب- غذا- انرژی در محدوده مطالعاتی مشهد با هدف حداکثرسازی سود خالص، حداکثر سازی تولید کالری، کاهش (انتشار گازهای گلخانه‌ای، انرژی، مصرف آب‌آبیاری و مصرف سموم و کودهای شیمیایی) با توجه به محدودیت‌های آب، زمین، کود و غیره برای تخصیص بهینه به محصولات کشاورزی است. در این مطالعه تلاش شده است با استفاده از روش برنامه‌ریزی ریاضی، امکان مصالحه‌ای بین اهداف حداکثر و حداقل‌سازی بصورت رویکرد همبست در سه سامانه آب- غذا- انرژی برای محصولات زراعی منطقه بررسی شود. به این امید که اطلاعات سودمندی جهت تدوین استراتژی‌های مناسب برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و افزایش درآمد کشاورزان در محدوده مطالعاتی مشهد فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی با توجه به قابلیت منحصربه فردی که در ارتباط بین اجزاء اقتصادی با جنبه‌های بیوفیزیک و اکولوژی دارند، امروزه بعنوان یکی از ابزارهای رایج و کارآمد در تحلیل مسائل اقتصادکشاورزی کاربرد دارند (Buysse *et al*., 2007). به بیان هیزل و نورتون (۱۹۸۶) اگرچه سایر الگوها نیز ممکن است با درجات مختلفی از این قابلیت برخوردار باشند، اما الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی با توجه به توانایی الگوسازی ماهیت چندگانه و به شدت وابسته فعالیت‌های کشاورزی، از مزیت منحصربه فردی در تحلیل سیاست‌های بخش کشاورزی برخوردارند. الگوسازی برنامه‌ریزی ریاضی از طریق ادغام روابط بین اجزاء مدل و محدودیت‌های موجود براساس همبست آب- غذا- انرژی نتایج جامع‌تر بعبارتی نزدیک به واقعیت ارائه می‌دهد. در این بخش توسعه مدل بهینه‌سازی مدیریت همبست آب- غذا- انرژی (WEFN) در چند بخش اقتصادی- زیست‌محیطی براساس مطالعه (Mo li *et al*., 2019) توصیف شده است. این مدل توانایی مدل‌سازی تعاملات و برهمکنش سه سامانه آب- غذا- انرژی از جمله عرضه - تقاضا آب، عرضه- تقاضای انرژی، تقاضای زمین، عملکرد محصولات، تخصیص آب و انرژی را دارد. مدل فرضی مورد بررسی، شامل اراضی تحت پوشش محصولات زراعی شهرستان‌های مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز است. در این مدل، آب مورد نیاز برای آبیاری محصولات زراعی، از منابع آب سطحی و زیرزمینی تأمین می‌شود. برق (الکتریسیته مصرفی) که برای جمع‌آوری و پمپاژ آب مورد نیاز در نیروگاه‌ها، تولید موادغذایی و تأمین بخش خانگی و صنعت استفاده می‌شود. همچنین در فرآیند تولید و فرآوری موادغذایی منابع آب (سطحی و زیرزمینی) و انرژی مورد نیاز است. در فرآیند تولید برق، مواد غذایی، آبیاری محصولات و مصرف کودها و سموم شیمیایی نیز گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص CO_2 منتشر می‌شود. بنابراین در این مطالعه سعی می‌شود یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با استفاده از تکنیک برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه (MOP) برای همبست آب- غذا- انرژی معرفی شود که توانایی پردازش تصمیمات مدیریتی را داشته باشد. در این مدل، علاوه بر بررسی جنبه اقتصادی، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای و زیست‌محیطی نیز بررسی می‌شود.

برنامه‌ریزی چندهدفه (MOP)

ساختار اصلی برنامه‌ریزی ریاضی در خصوص تعیین الگوی کشت محصولات زراعی تحت رویکرد همبست آب- غذا- انرژی، مبتنی بر مطالعات اخیر می‌باشد (Mo li *et al*., 2019; Esmaeilzadeh *et al*., 2020). این الگو شامل قسمت‌های توابع هدف: حداکثر سازی سود، حداکثرسازی تولید کالری، حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای، حداقل مصرف آب آبیاری، حداقل مصرف کود و سم و حداقل انرژی مصرفی و محدودیت‌های مربوط آب، زمین، کود، سم و انرژی بوده که متعاقباً بررسی می‌گردد. قبل از معرفی مدل برنامه‌ریزی ریاضی مورد استفاده و با توجه به تعداد زیاد مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترهای به‌کار رفته در مطالعه، خلاصه‌ای از نمادها و تعاریف هر کدام از این اجزاء در جدول ۱ ارائه شده است.

در یک چرخه همبست آب- غذا- انرژی، آب نقش مهمی را در هر یک از مراحل توسعه انرژی شامل استخراج، تولید و فرآوری سوخت‌های فسیلی، تولید برق و تصفیه ضایعات مربوط به فعالیت‌های انرژی ایفا می‌کند. از طرف دیگر، آب و انرژی برای تولید موادغذایی در کشاورزی مورد نیاز است، که عمدتاً برای آبیاری، تولید و فرآوری محصولات کشاورزی استفاده می‌گردد. در مدیریت آب، برای عملیات پمپاژ، جمع‌آوری، تصفیه و توزیع آب، لازم است انرژی مصرف شود.

انرژی در تولید موادغذایی و پردازش مکانیزه، آماده‌سازی زمین، تولیدات کود، ابزارهای کشاورزی، آبیاری، بسته‌بندی، فرآوری و ذخیره‌سازی موادغذایی مورد نیاز است، که براساس بررسی‌های انجام شده حدود ۳۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان مربوط به مراحل تولید و عرضه موادغذایی است (Eslami *et al*., 2019). از طرفی برخی از منابع تولید انرژی تجدیدناپذیر هستند که استفاده از آن‌ها باعث تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود.

جدول ۱- فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها، متغیرها و پارامترها
Table 1- List of symbols used in the model to define sets, variables and parameters

شرح **Description**	اندیس **Index**	شرح **Description**	اندیس **Index**
مجموع محصولات زراعی Total crops	$\boldsymbol{K} \in \{۱،......۹\}$	مجموع مناطق Total Areas	I∈{۱،۲،۳}
مقدار بارش مؤثر برای هر محصول در هر منطقه (متر مکعب/ هکتار) Effective precipitation amount for subarea (m3/ha)	Ep_P_{ik}	هدف حداکثرسازی سود ناخالص کشاورزان The goal is to maximize the gross profit of farmers	$Obj1Profit_V$
عملکرد محصولات هر منطقه Production yield of each region	Y_P_{ik}	هدف حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای Minimize greenhouse gas emissions	$Obj2\ CO2_V$
میزان انرژی تولید شده حاصل از مصرف یک واحد وزنی از محصولات زراعی The Amount of Energy Produced From the Consumption of one unit of weight of Crops	En_P_k	هدف حداقل‌سازی مصرف آب Minimize water consumption	$Obj4\ Wat_V$
هزینه بهره‌برداری از آب‌های سطحی برای آبیاری برای محصولات زراعی هر منطقه Cost of exploiting surface water for irrigation for crops in each region	Csw_P_{ik}	هدف حداقل‌سازی مصرف انرژی Minimize Energy consumption	$Obj5Energy\ Elec_V$
ضریب بهره‌برداری از آب‌های سطحی Surface water utilization coefficient	$Ucsw_P_i$	هدف حداکثرسازی تولید کالری از موادغذایی Maximize calorie production from food	$Obj6\ Coleri_V$
هزینه بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی برای آبیاری برای محصولات زراعی هر منطقه The cost of using groundwater for irrigation for crops in each area	CGw_P_{ik}	هدف حداقل‌سازی مصرف سم کود و سم Minimize fertilizers and pesticides consumption	$Obj3\ FP_V$
ضریب انتشار کربن در استفاده از کودها (کیلوگرم/ Co_2 کیلوگرم) Carbon emission coefficient in the use of fertilizers (kg / Co_2 kg)	Cef_P	مقدار انرژی تخصیص داده شده برای منابع آب هر منطقه (کیلو وات. ساعت) The amount of energy allocated to water resources in each area (kWh)	Eaw_V_i
ضریب انتشار کربن در استفاده از سوخت دیزل (کیلوگرمCo_2/ لیتر) Carbon emission coefficient in the use of diesel fuel (kg / co2 liters)	Ced_P	مقدار انرژی تخصیص داده شده برای تولید و فرآوری مواد غذایی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of energy allocated for food production and processing in each region (kWh)	Eaf_V_i
ضریب انتشار کربن در استفاده از رول‌های نایلونی کشاورزی (کیلوگرمCo_2/ کیلوگرم) Carbon emission coefficient in the use of agricultural nylon rolls (kg / Co_2 kg)	Ceaf_P	مقدار خالص تخصیص آب‌های زیرزمینی برای تولید مواد غذایی به محصولات زراعی هر منطقه (مترمکعب) Net amount of groundwater allocation for food production to crops in each area (cubic meters)	Gwf_V_{ik}
ضریب انتشار کربن در استفاده از سموم دفع آفات (کیلوگرمCo_2/ کیلوگرم) Carbon emission coefficient in the use of pesticides (kg / Co_2 kg)	Cep_P	میزان خالص تخصیص آب‌های سطحی برای تولید موادغذایی به محصولات زراعی هر منطقه (مترمکعب) Net allocation of surface water for food production to crops in each region (cubic meters)	Swf_V_{ik}

Esw_V_{ik}	مقدار برق تخصیص داده شده به آب‌های سطحی برای محصولات زراعی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of electricity allocated to surface water for crops in each area (kWh)	Cefp_P	ضریب انتشار کربن از برق برای فرآوری مواد غذایی (کیلوگرمCo_2/ کیلو وات. ساعت) Carbon emission coefficient from electricity for food processing (kg / Co_2 kWh)
Egw_V_{ik}	مقدار برق برای استخراج آب‌های زیرزمینی برای محصولات زراعی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of electricity for groundwater extraction for crops in each area (kWh)	Eu_P_{ig}	مقدار برق مصرفی در هکتار هر منطقه (کیلو وات. ساعت/ هکتار) Amount of electricity consumed per hectare per area (kWh / hectare)
Efp_V_{ik}	مقدار برق مصرفی برای تولید مواد غذایی و فرآوری محصولات زراعی هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Amount of electricity consumed for food production and processing of crops in each region (kWh)	Ea_P_i	مقدار قابل دسترس انرژی برای منطقه i (کیلو وات. ساعت) Available amount of energy for zone i (kWh)
		$Price_p_k$	قیمت فروش محصول (ریال/ کیلوگرم) The selling price of the product (Rial/Kg)
A_V_{ik}	سطح زیرکشت تخصیص یافته برای تولید موادغذایی به محصولات زراعی در هر منطقه (هکتار) Cultivated area allocated for food production to crops of each region (hectares)	Sws_P_i	آب عرضه شده از پروژه‌های آبرسانی Water supplied from water supply projects
		$Deman_P_{ik}^{Max}$	حداکثر تقاضای هر منطقه برای محصول Max demand of each region for the product
$Pasw_P_i$	نسبت بهره‌برداری از آب‌های سطحی کشاورزی هر منطقه Ratio utilization ratio of agricultural surface waters in each region	$Deman_P_{ik}^{Min}$	حداقل تقاضای منطقه برای محصول Min demand of each region for the product
$Pagw_P_i$	نسبت بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی کشاورزی هر منطقه Agricultural groundwater utilization ratio of each region	$Ucgw_P_i$	ضریب بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی Groundwater utilization coefficient
Wr_P_{ik}	نیاز آبی محصولات زراعی هر منطقه (مترمکعب/ هکتار) Water requirement of crops in each region (cubic meters / hectare)	$Ceuw_P_i$	هزینه‌های برق مصرفی برای جمع‌آوری انتقال و آب در هر منطقه Electricity costs for water collection and transmission in each area
$A_P_{ik}^{min}$	حداقل زمین تخصیص داده شده به محصولات زراعی هر منطقه (هکتار) Minimum land allocated to crops in each area (hectares)	$Ceuf_P_i$	هزینه‌های مصرف برق برای فرآوری مواد غذایی هر منطقه Electricity consumption costs for food processing in each region
$A_P_{ik}^{max}$	حداکثر زمین برای محصولات زراعی در منطقه (هکتار) Maximum land for crops in area (h)	Cf_P_{ik}	هزینه‌های مصرف کود به ازای هر واحد برای محصولات زراعی هر منطقه Fertilizer consumption costs per unit for crops in each region
Cp_P_{ik}	هزینه‌های مصرف سموم دفع آفات در هکتار محصولات زراعی هر منطقه Costs of pesticides per hectare of crops in each region	Pu_P_{ik}	مقدار مصرف سموم دفع آفات در هکتار هر منطقه (کیلوگرم/ هکتار) Amount of pesticides per hectare (kg / ha)

Cam_P_{ik}	هزینه عملیات ماشین‌آلات کشاورزی به ازای هر واحد برای محصولات زراعی در منطقه Cost of operating agricultural machinery per unit for crops in Area	Af_P_i	مقدار مصرف رول‌های نایلونی کشاورزی (کیلوگرم/ هکتار) Consumption of agricultural nylon rolls (kg / ha)
Caf_P_k	هزینه رول‌های نایلونی کشاورزی در هکتار محصولات زراعی (میلیون ریال/ هکتار) Cost of agricultural nylon rolls per hectare of crops (million rials / hectare)	Da_{P_i}	مقدار مصرف سوخت دیزل در هکتار هر منطقه (لیتر/ هکتار) Diesel fuel consumption per hectare per area (liters / hectare)
		$Cost_p_{ik}$	کل هزینه‌ها (میلیون ریال/ هکتار) Total Costs (Milio Rial/ha)
$Eusw_P_i$	میزان برق مصرفی به ازای هر واحد پمپاژ آب‌های سطحی در هر منطقه (کیلووات ساعت/ مترمکعب) Electricity consumption per unit of surface water pumping in each area (kWh / cubic meter)	Cei_P_i	ضریب انتشار کربن از برق برای آبیاری (کیلوگرم/ co2 کیلو وات. ساعت) Carbon emission coefficient from electricity for irrigation (kg / co2 kWh)
$Eugw_P_i$	میزان برق مصرفی به ازای هر واحد استحصال آب‌های زیرزمینی در هر منطقه (کیلووات ساعت/ مترمکعب) The amount of electricity consumed per unit of groundwater extraction in each area (kWh / cubic meter)	$Ecil_P_i$	انرژی مصرفی بخش صنعت و خانگی در هر منطقه (کیلو وات. ساعت) Energy consumption of industry and home sector in each region (kWh)
$Eufp_P_{ik}$	میزان برق مصرفی به ازای هر واحد تولید مواد غذایی برای محصولات زراعی در هر منطقه (کیلووات ساعت/ کیلوگرم) Electricity consumption per unit of food production for crops in each region (kWh / kg)	sws_P_i	تأمین آب‌های سطحی هر منطقه (مترمکعب) Surfacewater supply in each area (cubic meters)
Fu_P_{ik}	میزان مصرف کود در هکتار هر منطقه (کیلوگرم / هکتار) Fertilizer consumption per hectare per area (kg / hectare)	Gws_P_i	تأمین آب‌های زیرزمینی به صورت پمپاژ زیرزمینی هر منطقه (مترمکعب) Groundwater supply in the form of groundwater pumping in each area (cubic meters)

منبع: یافته‌های پژوهش. (P: نماد پارامتر و V: نماد متغیر است).

Source: Research Findings. (P: parameter symbol and V: variable symbol).

با این تفاسیر، متغیرهای تصمیم مدل چندهدفه غیرخطی برای همبست آب- غذا- انرژی شامل: مقدار انرژی تخصیص داده شده برای استحصال آب در هر منطقه (کیلوات- ساعت) که بیانگر رابطه (انرژی- آب) است، مقدار قابل دسترس انرژی برای تولید و فرآوری موادغذایی در هر منطقه (کیلوات- ساعت) که رابطه (انرژی- غذا) را توصیف می‌کند، میزان خالص تخصیص آب‌های سطحی و زیرزمینی برای تولید مواد غذایی به محصولات زراعی هر منطقه (میلیون متر مکعب) بیانگر رابطه (آب- غذا) است، مقدار کل برق مصرفی (استحصال آب‌های سطحی و استخراج یا پمپاژ آب‌های زیرزمینی برای محصولات زراعی هر منطقه (کیلوات- ساعت)، مقدار برق مصرفی برای تولید موادغذایی و فرآوری محصولات زراعی هر منطقه (کیلوات- ساعت) و اراضی تخصیص یافته برای تولید موادغذایی به محصولات زراعی هر منطقه (هکتار) می‌باشد.

با توجه به اینکه در رویکرد همبست آب- غذا- انرژی ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی بررسی می‌شود، بنابرین مدل‌سازی این مطالعه با توجه به سه سامانه آب- غذا - انرژی و جنبه‌های مختلف آن، اهداف متفاوتی را نیز شامل می‌شود. به‌علت انعطاف در مدل استفاده شده به‌راحتی می‌توان اهداف متفاوت را از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار داد. لذا در مطالعه حاضر ۶ هدف شامل: حداکثرسازی سود ناخالص و حداکثر تولید کالری از موادغذایی و اهداف حداقل‌سازی شامل: انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف کود و سم، آب آبیاری و انرژی دنبال شده و شکل جبری این اهداف در معادلات ۱ تا ۶ بیان شده است (Mo li *et al.*, 2019).

$$Max: Obj1Profit_V =$$

$$\sum_{i=1}^{I} \left[(Price_p_k . \sum_{k=1}^{K} Y_P_{ik} . A_V_{ik}) - \right.$$

$$\left(Csw_P_{ik}.\left(\sum_{k=1}^{K}\frac{Swf_v_{ik}}{Ucsw_P_i}\right)+CGw_P_{ik}.\left(\sum_{k=1}^{K}\frac{Gwf_v_{ik}}{Ucgw_P_i}\right)+\left(Ceuw_P_i\left(\sum_{k=1}^{K}Esw_v_{ik}+Egw_v_{ik}\right)+Ceuf_P_i\left(\sum_{k=1}^{K}Efp_v_{ik}\right)+\sum_{k=1}^{K}Cf_P_{ik}+CP_p_{ik}+Cam_P_{ik}\right)+\left(Cost_p_{ik}+Caf_P_k\right).\left(\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}\right)\right)\Bigg] \qquad (۱)$$

$$Min{:}\ Obj2\ CO2_V=\sum_{i=1}^{I}\Big(Ced_p.Du_p_{ik}\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}+Ceaf_p.Af_P_i\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}+Cep_p.\ Pu_p_{ik}\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}+Cei_p.Eu_p_{ik}\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}+Cefp_p.\sum_{k=1}^{K}Efp_V_{ik}+Cef_p.Fu_p_{ik}\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}\Big) \qquad (۲)$$

$$Min{:}\ Obj3\ FP_V=\sum_{i=1}^{I}\Big(Fu_p_{ik}\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}+Pu_p_{ik}\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}\Big) \qquad (۳)$$

$$Min{:}\ Obj4\ Wat_V=\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K}\Big((Swf_v_{ik}/Ucsw_p_i)+(Gwf_v_{ik}/Ucgw_p_i)\Big) \qquad (۴)$$

$$Min{:}\ Obj5Energy\ Elec_V=\sum_{i=1}^{I}(Eaw_V_i+Eaf_V_i) \qquad (۵)$$

$$Max{:}\ Obj6\ Coleri_V=\sum_{i=1}^{I}\Big(En_P_k.Y_P_{ik}\sum_{k=1}^{K}A_V_{ik}\Big) \qquad (۶)$$

با توجه به اهداف ذکر شـــده، در نظر گرفتن چند هدف متفاوت منجر به یک الگوســازی در قالب یک برنامه‌ریزی چندهدفه (MOP) می‌شــود. در مطالعه حاضــر، برای متجانس کردن اهداف، از چارچوب کلی مـدل برنـامـه‌ریزی غیرخطی چنـدهـدفـه برگرفتـه از مطـالعات Buysse *et al.*, 2007; Mardani Najafabadi *et al.*, 2019; Marzban *et al.*, 2020) استفاده شده است.

توابع اهداف مشـــروط به محدودیت‌هایی اســـت که در ادامه بیان خواهد شد.

میزان برق مصــرفی برای تخصــیص و توزیع آب‌های ســطحی و پمپاژ آب‌های زیرزمینی نباید از میزان مجاز آن برای هر منطقه بزرگتر باشد. این محدودیت در معادله ۷ وجود دارد.

$$Eusw_P_i\left[\left(\frac{\sum_{k=1}^{k}Swf_V_{ik}}{Ucsw_P_i}\right)+Eugw_P_i\left[\left(\frac{\sum_{k=1}^{k}Gwf_V_{ik}}{Ucgw_P_i}\right)\right]\right]\le Eaw_V_i \qquad (۷)$$

مقدار انرژی مصـــرفی در فرآیند تولید و فرآوری موادغذایی نباید بیشــتر از مقدار انرژی تخصــیص داده شــده در فرآیند تولید و فرآوری موادغذایی در منطقه باشد. این محدودیت در معادله ۸ بیان شده است.

$$\sum_{k=1}^{k}(Eufp_P_{ik}.Y_P_{ik}).A_V_{ik}\le Eaf_V_i\ \forall_i \qquad (۸)$$

دسترسی به انرژی برای تخصیص و انتقال آب‌های سطحی، پمپاژ آب‌های زیرزمینی، تولید و فرآوری غذا نباید بیشــتر از کل انرژی قابل دســترس برای کشــاورزی در هر منطقه به اســتثناء دســترسی به کل انرژی مصــرفی بخش‌های خانگی و صــنایع باشــد. این محدودیت در معادله ۹ وجود دارد.

$$Eaw_V_i+Eaf_V_i\le Ea_P_i-Ecil_P_{ik}\ \ \forall_i \qquad (۹)$$

میزان تخصـیص آب‌های سـطحی برای همه محصـولات در هر منطقه نباید بیشتر از آب عرضه شده از طریق پروژهای آبرسانی، مانند پروژه انتقـال آب، پروژه ذخیره آب و پروژه‌هـای آبگیری باشـــد. این محدودیت در معادله ۱۰ وجود دارد.

$$\frac{\sum_{k=1}^{k}Swf_V_{ik}}{Ucsw_P_i}\le Sws_P_i\,.Pasw_P_i\qquad \forall_i \qquad (۱۰)$$

مشـابه آب‌های سـطحی، تخصیص آب‌های زیرزمینی برای همه محصـــولات منطقه نباید بیشـــتر از میزان پمپاژ آب زیرزمینی باشـــد (معادله ۱۱).

$$\frac{\sum_{k=1}^{k}Gwf_V_{ik}}{Ucgw_P_i}\le Gws_P_i.Pagw_P_i\qquad \forall_i \qquad (۱۱)$$

مقدار آب تخصیص یافته و بارندگی موثر برای هر محصول در هر منطقه باید نیاز آبی برای تولید مواد غذایی را تأمین نماید (معادله ۱۲).

$$Swf_V_{ik}+Gwf_V_{ik}+(Ep_P_{ik}.A_V_{ik})\ge Wr_P_{ik}.A_V_{ik}\quad \forall_i \qquad (۱۲)$$

میزان حداکثر و حداقل زمین قابل کشـت برای همه محصــولات به‌صورت معادله ۱۳ تعیین می‌شود.

$$A_P_{ik}^{min}\le A_V_{ik}\le A_P_{ik}^{max}\qquad \forall_{i},k \qquad (۱۳)$$

میزان تولید هر محصـول نباید از مقدار حداکثر و حداقل تقاضای آن انحراف پیدا کند. این محدودیت در معادله ۱۴ و ۱۵وجود دارد.

$$\sum_{i=1}^{I}A_V_{ik}\,.Y_P_{ik}\le Deman_P_{ik}^{Max}\qquad \forall_{k},i \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{i=1}^{I}A_V_{ik}\,.Y_P_{ik}\ge Demand_P_{ik}^{Min}\qquad \forall_{k},i \qquad (۱۵)$$

توجه شـــود کـه معـادلـه ۱۵ بـا اعمال یک حداقل مورد نیاز از محصولات، در بحث امنیت غذایی دخیل است. بعبارت دیگر، علاوه بر هدف حداکثر سـازی تولید کالری از طریق مصرف مواد غذایی (معادله ۶) در این معادله نیز به موضوع امنیت غذایی پرداخته شده است.

در نهایت مجموعه غیرمنفی متغیرهای مدل به‌صـورت معادله ۱۶ تعیین می‌شود.

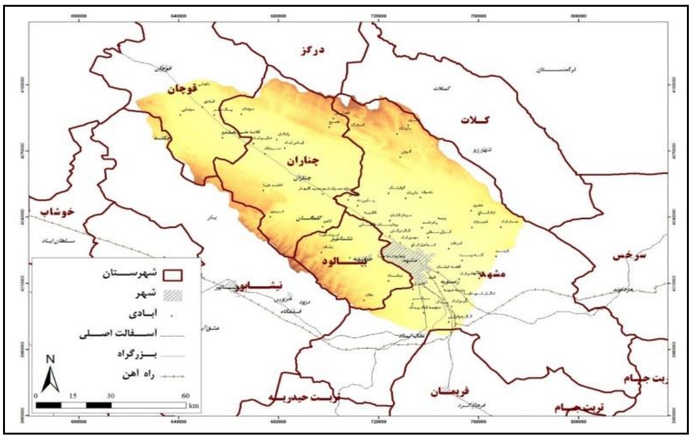
$$\begin{aligned}&Swf_V_{ik}\ge 0 && \forall_{i},k\\&Gwf_V_{ik}\ge 0 && \forall_{i},k\\&A_V_{ik}\ge 0 && \forall_{i},k\\&Esw_V_{ik}\ge 0 && \forall_{i},k\\&Egw_V_{ik}\ge 0 && \forall_{i},k\\&Efw_V_{ik}\ge 0 && \forall_{i},k\\&Eaw_V_i\ge 0 && \forall_{i},k\\&Eaf_V_i\ge 0 && \forall_{i},k\end{aligned} \qquad (۱۶)$$

منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی مشهد در غرب حوضه آبریز قره‌قوم و در شمال استان خراسان رضوی، در محدوده به‌طول ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۶

درجه و ۳ دقیقه شمالی واقع شده است. مساحت محدوده برابر ۹۹۰۸ کیلومتر مربع بوده و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا برابر با ۱۴۹۷ متر است. براساس آخرین مالعات بیلان منابع آب میانگین بارش ۴۵ ساله در سطح محدوده مطالعاتی، ۲۷۰ میلی‌متر است. مهمترین رودخانه آن کشف‌رود می‌باشد که از سرشاخه‌های رودخانه هریرود بوده و در نهایت به کویر قره‌قوم در خاک ترکمنستان می‌ریزد (Azamirad *et al.*, 2018).

به دلیل این‌که برنامه‌ریزی‌های ملی و منطقه‌ای براساس مرزهای سیاسی و در سطح شهرستان‌ها انجام می‌شود، در شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی مشهد و مرز شهرستان‌های واقع در آن ارائه شده است.



شکل ۱- محدوده مطالعاتی مشهد، شهرستان‌ها، مراکز شهری و روستایی
منبع: (کتاب آب استان خراسان رضوی، ۲۰۱۶)
Figure 1- Mashhad study area, cities, urban and rural centers
Source: (water book of Khorasan Razavi province., 2016)

در این محدوده تعداد ۵ شهرستان وجود دارد که یا به‌طور کامل و یا قسمتی از آن‌ها با محدوده مطالعاتی مشهد منطبق است. شهرستان‌های چناران تقریباً به‌طور کامل و ۴۷ درصد از شهرستان مشهد، قسمت های جزئی از ۷ درصد از شهرستان طرقبه- شاندیز در این محدوده مطالعاتی واقع هستند. منابع آب سطحی این محدوده شامل سدها، رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و مسیل‌ها بوده که عمدتا دارای رژیم برفی بارانی است. در حال حاضر جریانات دائم (پایه) این رودخانه عمدتا به شاخه اصلی رودخانه (کشف‌رود) نمی‌رسد و در اراضی آبخور واقع شده در حوضه آبریز همان رودخانه به مصرف کشاورزی رسیده و فقط جریانات سیلابی به شاخه اصلی رودخانه می‌رسد. این امر عمدتا به دلیل تغییر کاربری اراضی حاشیه رودخانه‌ها از کشت غلات به کشت باغات در طی سالیان گذشته است (Report in Kashfarud Basin, 2009).

شهرستان‌های مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز مهمترین شهرهای واقع در محدوده مطالعاتی مشهد می‌باشند. عمده محصولات زراعی کشت شده در این مناطق شامل گندم، جو، چغندرقند، سیب‌زمینی، پیاز، گوجه‌فرنگی، خیار، ذرت علوفه‌ای و یونجه می‌باشد که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است، استان خراسان رضوی در تولید محصولات جو، خیار، گوجه‌فرنگی، پیاز و سبزیجات دارای رتبه‌های اول تا سوم می‌باشد (Agricultural Jihad Organization, 2019-2020). داده‌های مورد نیاز مطالعه، از طریق بررسی نشریه‌ها، گزارشات و سالنامه‌های آماری کشاورزی سال ۹۹-۹۸ و مصاحبه با کارشناسان هر شهرستان و از طریق شرکت‌های مهندسین مشاور (به دلیل تکمیل بودن اطلاعات) مربوطه گردآوری شد.

نتایج و بحث

در جدول ۲ فهرست داده‌های اولیه در این مطالعه ارائه شده است. عملکرد محصولات زراعی نشان داد که ذرت علوفه‌ای با ۵۵ تن در مشهد بیشترین و جو با ۳/۶ تن کمترین میزان عملکرد را به خود اختصاص داده است. در بین محصولات مورد بررسی، چغندرقند با میزان الکتریسیته مصرفی ۹۰۵۷ کیلوات- ساعت بیشترین و جو با مصرف ۲۴۹۲ کیلوات- ساعت در هکتار کمترین میزان مصرف الکتریسیته را داشته است. بنابراین گندم، جو، یونجه و ذرت به لحاظ مصرف سایر نهاده‌ها (کود، سم) کمترین میزان هزینه را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۲- فهرست داده‌های اولیه محصولات زراعی
Table 2- List of basic crop data

کشت Product	تولید کالری (کیلو) Calories (Kilo)	سم (کیلوگرم/ هکتار) Pesticides (Kg / ha)	کود مصرفی (کیلوگرم/ هکتار) Fertilizer consumption (tons / ha)	عملکرد (تن/ هکتار) Yeild (Ton/ ha)	نیاز ناخالص آبی (مترمکعب/ هکتار) Gross water requirement (MCM / ha)	برق مصرفی (کیلوات- ساعت/ هکتار) Electricity consumption (kw.h/ ha)
گندم Wheat	3500	1/391	392	4/2	6644	2969
جو Barley	3890	0/962	364	3/6	5577	2492
چغندرقند SugarBeet	460	4/38	572	35	20266	9057
پیاز Onion	400	4/18	606	50	1511	6842
سیب زمینی Potato	770	3/64	706	35	19600	8759
گوجه فرنگی Tomato	180	2/97	641	40	18022	8054
یونجه Alfalfa	230	0/957	253	11	18511	8272
ذرت Maize	860	2/13	543	55	13600	6078
خیار Cucumber	120	4/18	456	25	13111	5859

منبع: سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی، ۱۳۹۹-۱۳۹۸
Source: Khorasan Razavi Agricultural Jihad Organization, 2019-2020.

نتایج مدل برنامه‌ریزی غیرخطی پیشنهادی در محدوده مطالعاتی مشهد (شهرستان‌های مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز) براساس اهداف چندگانه رویکرد همبست آب- غذا- انرژی برای محصولات مختلف زراعی در جدول ۳ ارائه شده است. اطلاعات جدول ۳ مبنی بر میزان تغییرات سطح زیر کشت چندهدفه محصولات زراعی نسبت به الگوی جاری محاسبه شده است. نتایج نشان داد میزان تغییر سطح زیرکشت چندهدفه نسبت به الگوی کشت جاری در مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز به‌ترتیب ۲۵/۹۲، ۵۳/۰۵ و ۵۵/۸۸ درصد کاهش داشته است. همچنین سطح زیرکشت محصولات جو و ذرت در الگوی چندهدفه مشهد به‌ترتیب از ۱۱۰۰۰ به ۱۲۸۹۲ (معادل ۱۷ درصد) و از ۲۷۰۰ به ۳۱۰۱ هکتار (معادل ۱۵ درصد) نسبت به الگوی جاری افزایش یافته است. سطح زیرکشت محصول جو در هدف حداکثرسازی سود خالص برابر ۱۶۹۳۴ هکتار (معادل ۴۶/۷۱ درصد) افزایش بود. همچنین سطح زیرکشت محصول جو در مشهد با توجه به هدف حداقل‌سازی مصرف آب‌آبیاری از ۱۱۰۰۰ به ۱۰۸۷۷ هکتار معادل (معادل ۱/۱۱ درصد) کاهش یافته است و در سایر اهداف حداقل‌سازی از جمله مصرف انرژی، انتشارگازهای گلخانه‌ای و مصرف کود و سم به میزان ۱۲۸۹۲ هکتار بود که معادل ۱۷ درصد افزایش می‌یابد. مجموع کل سطح زیرکشت در الگوی جاری در مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز به‌ترتیب از ۳۴۳۹۰، ۲۹۴۴۶، از ۴۸۶۳۹ به ۲۶۰۲۷ و از ۱۷۰ هکتار به ۷۵ هکتار در الگوی چندهدفه با هدف حداکثرسازی سود خالص معادل ۴۱/۴ درصد افزایش، ۱۱/۶۱ درصد و ۵۵/۸ درصد کاهش را نشان داد. شایان ذکر است در شهرستان‌های مورد بررسی مجموع سطح زیرکشت در اهداف حداقل‌سازی انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف کود و حداقل مصرف آب‌آبیاری نسبت به حالت جاری کاهش و مقدار آن برای تمامی اهداف حداقل‌سازی کاهشی بوده است.

بیشترین کاهش سطح زیرکشت در شهرستان چناران و طرقبه- شاندیز در الگوی چندهدفه در بین محصولات را گندم، جو، یونجه، ذرت، چغندرقند، گوجه‌فرنگی و سیب‌زمینی به خود اختصاص داده‌اند. کاهش سطح زیرکشت گندم در الگوی بهینه برای شهرستان‌های مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز ۶۰ درصد نسبت به الگوی جاری

برآورد شده است. همچنین مجموع کاهش سطح زیرکشت در الگوهای حداقل‌سازی مصرف انرژی ۲۵۴۷۵ هکتار در مشهد (معادل ۲۶ درصد)، مصرف آب‌آبیاری در چناران برابر ۱۵۹۵۴ هکتار (معادل ۴۶ درصد)، انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف کود و سم برابر ۱۰۰ هکتار (معادل۴۱/۱۷ درصد) برای طرقبه- شاندیز بسیار مشهود بوده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که محصولاتی که اثرات زیست‌محیطی بالایی دارند میزان سطح زیرکشت آن‌ها در الگوی بهینه کاهش یافته است.

جدول ۳- سطح زیرکشت محصولات کشاورزی محدوده مطالعاتی مشهد (هکتار)

Table 3- Cultivation area of agricultural products inMashhad-Chenaran plain (ha)

شهرها Cities	محصولات Products	جاری Current	حداکثرسازی سود خالص Max Profit	حداکثر تولید کالری Max Calories	حداقل انتشار گازهای گلخانه‌ای Min greenhouse gas emissions	حداقل مصرف انرژی Minenergy consumption	حداقل مصرف آب-آبیاری Min water irrigation	حداقل مصرف سم و کود Min of pesticides and fertilizers	چندهدفه MOP	درصد تغییرات Percentage of changes
مشهد Mashhad	گندم Wheat	11500	16873	16873	4619	4619	4619	4619	4619	-60
	جو Barley	11000	16934	8484	12892	12892	10877	12892	12892	17
	چغندرقند SugarBeet	560	687	687	333	333	333	333	333	-41
	پیاز Onion	890	1106	1106	605	605	605	605	605	-32
	سیب زمینی Potato	90	110	110	55	55	55	55	55	-39
	گوجه فرنگی Tomato	3100	3850	1689	1689	1689	1689	1689	1689	-46
	یونجه Alfalfa	3650	4716	1460	1460	1460	1460	1460	1460	-60
	ذرت Maize	2700	3259	3259	3101	3101	3101	1717	3101	15
	خیار Cucumber	900	1103	721	721	721	721	721	721	-20
	جمع Total	34390	48639	34390	25450	25475	23460	24092	25475	-25.92
چناران Chenaran	گندم Wheat	10700	13576	13064	4296	4296	4296	4296	4296	-60
	جو Barley	10200	4803	9442	4803	4803	6933	4803	4803	-53
	چغندرقند SugarBeet	1825	2238	1706	1149	1149	1149	1149	1149	-37
	پیاز Onion	251	310	310	174	174	174	174	174	-30
	سیب زمینی Potato	230	281	281	143	143	143	143	143	-38
	گوجه فرنگی Tomato	2765	3416	1862	1862	1862	1862	1862	1862	-33
	یونجه Alfalfa	1730	692	692	692	692	692	692	692	-60
	ذرت Maize	1730	692	2076	692	692	692	2076	692	-60
	خیار Cucumber	15	19	12	12	12	12	12	12	-19
	جمع Total	29446	26027	29446	13823	13823	15954	15207	13823	-53.05
	گندم	54	67	22	22	22	22	22	22	-60

طرقبه-شاندیز Torghabe-Shandiz	Wheat									
	جو Barley	61	26	47	26	26	26	47	26	-57
	پیاز Onion	8	10	6	6	6	6	6	6	-31
	سیب زمینی Potato	3	4	2	2	2	2	2	2	-42
	گوجه فرنگی Tomato	4	5	2	2	2	2	2	2	-41
	یونجه Alfalfa	5	2	2	2	2	2	2	2	-60
	ذرت Maize	30	12	36	36	12	12	36	12	-60
	خیار Cucumber	5	6	4	4	4	4	4	4	-18
	جمع Total	170	75	100	100	75	75	100	75	-55.88

ماخذ: یافته‌های تحقیق
Source: Research findings

در مجموع بررسی کل سطح زیرکشت محصولات در جدول ۳ نشان داد که سطح زیرکشت مشهد با هدف حداکثرسازی سود از ۳۴۳۹۰ هکتار الگوی جاری به میزان ۴۸۶۳۹ هکتار افزایش یافت. همچنین مجموع سطح زیرکشت محصولات در چناران از ۲۹۴۴۶ هکتار در الگوی جاری به ۲۶۰۲۷ هکتار در هدف حداکثرسازی سود کاهش یافته است. در مقابل سطح زیرکشت مشهد و چناران با هدف حداکثرسازی تولید کالری برابر با الگوی جاری به‌ترتیب۳۴۳۹۰ و ۲۹۴۴۶ بوده است. اما در طرقبه- شاندیز سطح زیرکشت به میزان ۱۰۰ هکتار از ۱۷۰ هکتار با هدف حداکثرسازی تولید کالری و ۷۵ هکتار با هدف حداکثرسازی سود نسبت به الگوی جاری کاهش پیدا کرده است. بیشترین تغییر در سطح زیرکشت الگوی چندهدفه برای محصولات یونجه و گندم در مشهد به میزان ۶۰ درصد کاهش بود. سطح زیرکشت سیب‌زمینی در هدف حداکثر سازی سود خالص و حداکثر سازی تولید کالری برای مشهد (افزایش از ۹۰ هکتار الگوی جاری به ۱۱۰ هکتار الگوی چند هدفه)، چناران (افزایش از ۲۳۰ هکتار الگوی جاری به ۲۸۱ هکتار الگوی چند هدفه) و در طرقبه- شاندیز از ۳ هکتار به ۲ هکتار کاهش یافته است. همچنین سطح زیرکشت پیاز در اهداف حداکثرسازی سود و کالری برای مشهد و چناران افزایش و در طرقبه- شاندیز سطح زیرکشت آن در اهداف حداکثرسازی سود و کالری به‌ترتیب افزایش و کاهش یافته است. بنابراین این امر بیانگر مزایای اقتصادی کشت این محصول می‌باشد. در مقابل سطح زیرکشت این محصول (پیاز) در اهداف حداقل‌سازی مصرف آب‌آبیاری، انرژی، انتشارگازهای گلخانه‌ای و مصرف کورد و سم در کلیه مناطق نسبت به حالت جاری کاهش یافته است. بطور کلی کشت این محصول علاوه بر مزیت اقتصادی از جنبه زیست‌محیطی نیز مقرون به‌صرفه می‌باشد. شایان ذکر است که در هدف حداقل‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف کود- سم، مصرف انرژی و آب‌آبیاری (اهداف زیست‌محیطی) سطح زیرکشت برای محصولات گوجه‌فرنگی، پیاز، یونجه، خیار و چغندرقند در همه شهرها کاهش و در هدف حداکثرسازی سود (اهداف اقتصادی) سطح زیرکشت محصولات پیاز، سیب‌زمینی، خیار، گوجه‌فرنگی، چغندرقند و گندم در همه شهرها افزایش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان داد محصولاتی که به‌لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی، با اهداف متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اگر چه از دیدگاه زیست‌محیطی (مصرف آب، انرژی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، مصرف سم و کود) دارای محدودیت‌های برای کشت در شهرهای مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز می‌باشند، اما از نظر تولیدکالری (گندم، ذرت، پیاز، سیب‌زمینی، چغندرقند و گوجه‌فرنگی) و افزایش سود دارای مزیت اقتصادی برای کشاورزان مناطق می‌باشند. لذا، بایستی سطح زیرکشت محصولات کشاورزی که اثرات زیست‌محیطی بالایی دارند کاسته شده و یا با ملاحظات زیست‌محیطی بیشتری کشت شوند، در مقابل استراتژی افزایش تولید به سمت محصولاتی که اثرات زیست‌محیطی کمتر و جنبه اقتصادی بیشتری دارند تغییر داده شود.

با توجه به اینکه محصولات زراعی نقش تعیین کننده‌ای در امنیت‌غذایی جوامع به‌عهده دارند؛ بنابراین در آینده اراضی زراعی بیش از سایر منابع، محدود کننده تولید غذا در جهان خواهد بود (Karabulut *et al.*, 2018). در نتیجه بهره‌برداری صحیح از آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Tichenor *et al.*, 2017; Chiun and Hwong, 2020). لذا بکارگیری رویکرد همبست از طریق مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی علاوه بر توسعه اقتصادی در مدیریت بهینه منابع نقش مهمی دارد. بنابراین در شهرستان‌های محدوده

مطالعاتی مشهد (مشهد، چناران و طرقبه- شاندیز) لازم است علاوه بر افزایش کالری حاصل از تولید محصول، برای به دست آوردن سود بیشتر و کاهش اثرات زیست‌محیطی، سطح زیرکشت بیشتری را به کشت ذرت و جو اختصاص داد.

مردانی نجف‌آبادی و همکاران (Mardani Najafabadi *et al.*, 2019)، مرزبان و همکاران (Marzban *et al.*, 2020) و ویست (West, 2019) در راستای برنامه‌ریزی برای کشت محصولات کشاورزی اهداف سود اقتصادی، کاهش هزینه‌ها و انتشار گازهای گلخانه‌ای را در تعیین الگوی کشت محصولات بصورت تک‌بعدی مورد بررسی قرار دادند؛ در صورتی که در مطالعه انجام شده با دیدگاهی متفاوت از سایر پژوهش‌ها از طریق بکارگیری رویکرد همبست آب- غذا- انرژی با استفاده از مدل‌های چندهدفه مورد بررسی قرار داد.

بنابراین با اجرای برنامه پیشنهاد شده در این مطالعه با رویکرد یکپارچه سه سامانه آب- غذا- انرژی، اثرات سوء استفاده از کود و سموم شیمیایی بر آب، خاک و هوا، همچنین هزینه‌های مربوط به تهیه نهاده‌ها و مصرف نهاده‌های تجدیدپذیر و غیرقابل تجدید کاهش می‌یابد و در بلندمدت اثرات مطلوبی بر بخش اقتصادی، زیست‌محیطی و مدیریت منابع برجای خواهد گذاشت. ثمره این الگو، دستیابی به اهداف توسعه پایدار در بهره‌برداری بهینه از منابع و عوامل تولید بصورت مستمر و پایدار است.

برخی از متغیرهای مهم و درصد تغییرات آن‌ها برای مدل‌سازی ریاضی در راستای همبست آب- غذا- انرژی در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج نشان داد سطح زیرکشت برای محصولات زراعی مورد بررسی در محدوده مطالعاتی مشهد به دلیل تغییر شرایط اقلیمی منطقه و در پی برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی که در نهایت افت سفره آب زیرزمینی را به‌دنبال داشته، ۴۸/۳۸ درصد کاهش یافته است. مقدار مصرف سم (۳۷/۹ درصد)، کود (۳۸/۳ درصد) و هزینه‌های تولید (۶۰/۸ درصد)، انتشار گازهای گلخانه‌ای (۴۰ درصد)، مصرف سوخت دیزل (۳۸/۴ درصد) و تولید کل (۳۳ درصد) در الگوی چندهدفه برای محدوده مطالعاتی مشهد کاهش و سود خالص کشاورزان ۴۹/۳ درصد افزایش یافته است.

با توجه به اینکه یکی از سیاست‌های مهم رویکرد همبست آب- غذا- انرژی در بهبود نقش اقتصادی بخش‌کشاورزی، کاهش انتشارگازهای گلخانه‌ای یا همان اثرات زیست‌محیطی و اجرای الگوی کشت مناسب می‌باشد، لذا کاهش این متغیر در الگوی بهینه دلیلی بر توجیه این مهم بوده است. به‌طور کلی با بکارگیری رویکرد همبست در انتخاب سطح زیرکشت محدوده مطالعاتی مشهد، سطح زیرکشت در الگوی بهینه از ۶۴۰۰۶ به ۳۹۸۷۳ هکتار (۴۸/۳۸ درصد) تقلیل می‌یابد، در راستای تأمین امنیت‌غذایی جامعه می‌توان از طریق کشت فراسرزمینی یا تهیه طرح آمایش سرزمینی و اجرای دقیق آن اقدام نمود. همچنین از طریق جایگزینی کشت محصولات با توجه به پتانسیل سازگاری آن‌ها و مصرف نهاده‌ها (آب، انرژی، کود و سم) با وضعیت منابع هر منطقه نیاز جوامع را تأمین خواهد شد. از طرفی بایستی بخش‌ها و مناطق مناسب برای کشت محصولات خاص در استان خراسان رضوی شناسایی شود. درنهایت الگوهای کشت بهینه بر مبنای محدودیت منابع آب، انرژی و سطح زیرکشت تهیه و اجرا شود. مصرف آب‌آبیاری از ۸۰۷ به ۵۹۸ میلیون متر مکعب (معادل ۲۵ درصد)، انرژی از ۲۲۳۱ به ۱۰۴۶ هزار مگاوات- ساعت (معادل ۵۳/۱۱ درصد) و میزان تولید کالری محصولات از ۹۷۵/۳ به ۶۴۷/۴ (معادل ۳۳ درصد) میلیارد کالری کاهش می‌یابد. به دلیل اینکه مهمترین عامل محدود کننده در الگوی کشت منطقه‌ای نهاده آب‌آبیاری می‌باشد، و علت آن اثرپذیری زیاد نتایج مدل بهینه نسبت به مدل حداقل‌سازی مصرف آب‌آبیاری بوده است. شایان ذکر است با بکارگیری همبست آب- غذا- انرژی، میزان تولید کالری کاهش و سود ناخالص کشاورزان نیز در الگوی چند هدفه افزایش یافته است. بنابراین با افزایش راندمان مصرف آب و کاهش فاصله عملکرد با مقدار مورد انتظار، می‌توان سطح خودکفایی تولید غذا را به سطح قابل قبولی افزایش داد.

انتخاب الگوی کشت بدون کاربست سامانه آب- غذا- انرژی، تنها اهداف اقتصادی را مورد توجه و تأکید قرار خواهد داد، اما بکارگیری این رویکرد در بخش‌کشاورزی علاوه بر اهداف اقتصادی، اثرات زیست‌محیطی و روابط متقابل میان منابع آب، غذا و انرژی نیز بصورت کمی تجزیه و تحلیل می‌شود. در مطالعه حاضر اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف نهاده‌ها (سم، کود، آب‌آبیاری، الکتریسیته و سوخت دیزل)، هزینه‌های تولید و الکتریسیته مصرفی برای انتقال، پمپاژ آب، فراوری مواد غذایی نیز در بلندمدت کاهش می‌یابد (جدول۴).

جدول ۴- متغیرهای مهم پیشنهادی محصولات زراعی در رویکرد همبست آب- غذا- انرژی

Table 4- Important variables proposed by crops in the water-food-energy correlation approach

متغیرها **Variables**		مشهد **Mashhad**	چناران **Chenaran**	طرقبه- شاندیز **Torghabeh-Shandiz**	جمع کل **Total**
سطح زیرکشت تخصیص یافته به محصولات زراعی در هر منطقه (هکتار) Crop area allocated to crops in each area (hectares)	جاری Current	34390	29446	170	64006
	بهینه Optimal	25475	13823	75	39873
	درصد تغییر Percentage change	-25.92	-53.05	-55.88	-38.48
مقدار انرژی تخصیص داده شده برای منابع در هر منطقه (هزار مگاوات. ساعت) The amount of energy allocated to resources in each area (Thousand MWh. Hours)	جاری Current	1485	742	4	2231
	بهینه Optimal	634	409	3	1046
	درصد تغییر Percentage change	-57.3	-49	-25	-53.11
مقدار مصرف کود (هزار تن) Fertilizer consumption (Thousand tons)	جاری Current	14.4	12	0.03	26.5
	بهینه Optimal	10.3	6	0.07	16.4
	درصد تغییر Percentage change	-28.4	-50	-133	-38.3
مقدار مصرف سم (هزار تن) Pesticides consumption (Thousand tons)	جاری Current	55.4	44.4	0.276	100
	بهینه Optimal	39	23	0.130	62.13
	درصد تغییر Percentage change	-29.6	-48.2	-53	-37.9
مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای (میلیون تن) Emission of greenhouse gases (million tons)	جاری Current	114.2	91.3	0.516	206
	بهینه Optimal	77.8	45.8	0.238	123.9
	درصد تغییر Percentage change	-31.8	-49	-53	-40

میزان تولید کالری از موادغذایی (میلیارد کالری در هکتار) Calories production from food (billion calories per hectare)	جاری Current	524	448	3.3	975.3
	بهینه Optimal	439	207	1.4	647.3
	درصد تغییر Percentage change	-16.2	-53	-57.7	-33.6
آب‌آبیاری در هر منطقه (میلیون متر مکعب) Irrigation water in each area (million cubic meters)	جاری Current	442.8	362.7	2	807.5
	بهینه Optimal	363.3	234	1.3	598.6
	درصد تغییر Percentage change	-18	-35.4	-35	-25.8
سوخت مصرفی دیزل (هزار لیتر) Diesel fuel consumption (thousand liters)	جاری Current	1031	883.4	5	1919.4
	بهینه Optimal	764.3	417.4	2.3	1181.3
	درصد تغییر Percentage change	-26	-53	-54	-38.4
هزینه تولید کل (میلیارد ریال) Total production cost (Milyard Rials)	جاری Current	5786	4776	26	10588
	بهینه Optimal	2534	1607	8	4149
	درصد تغییر Percentage change	-56.2	-66.3	-69.2	-60.8
سود ناخالص کل (میلیارد ریال) Gross total profit (Milyard Rials)	جاری Current	1377	1305.5	6	2685.7
	بهینه Optimal	2339	1664.2	7.7	4011
	درصد تغییر Percentage change	69	27.5	28	49.3
تولید کل (هزار تن) Total production (thousand tons)	جاری Current	947.2	229.8	2.3	919.7
	بهینه Optimal	385.8	229.8	1.4	617
	درصد تغییر Percentage change	-22.4	-45.4	-39	-33

ماخذ: یافته‌های تحقیق

Source: Research findings

نتایج حاصل از جدول ۴ نشان داد با بکارگیری همبست آب- غذا- انرژی سطح زیرکشت تخصیص یافته به محصولات زراعی در محدوده مطالعاتی مشهد برابر ۳۸ درصد، میزان انرژی تخصیص داده شده ۵۳ درصد، مصرف کود و سم ۳۸ درصد، مقدار انتشارگازهای گلخانه‌ای ۴۰ درصد، آب‌آبیاری ۲۵ درصد کاهش یافته و سود ناخالص به میزان ۴۹ درصد افزایش می‌یابد. در این راستا با توجه به کاهش

سطح زیرکشت محصولات در رویکرد همبست، توسعه کشت ارگانیک، همچنین توسعه کشت محصولات گلخانه‌ای جهت افزایش عملکرد، افزایش کالری حاصل از تولید محصول، جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدیریت آب، انرژی و شناسایی مناطق مناسب برای کشت برخی از محصولات زراعی با هدف تأمین امنیت غذایی و جلوگیری از مصرف بیش از حد کود و سم شیمیایی در راستای اهداف محیط‌زیست توصیه می‌شود. به بیان دیگر برای دستیابی به اهداف کسب حداکثر سود و حداقل اثرات زیست‌محیطی بایستی سطح زیرکشت گندم، گوجه‌فرنگی، خیار، پیاز، سیب‌زمینی و چغندرقند افزایش یابد. بنابراین با اجرای الگوی بهینه همبست آب- غذا- انرژی در محدوده مطالعاتی مشهد در مجموع انتشار گازهای گلخانه‌ای از ۲۰۶ به ۱۲۳/۹ میلیون تن معادل ۴۰ درصد به محیط‌زیست کاسته شده است.

با لحاظ کردن و اجرای الگوی بهینه همبست آب- غذا- انرژی محاسبه شده در این مطالعه به کشاورزان این امکان را می‌دهد که همزمان با حفظ درآمد اقتصادی، ملاحظات زیست محیطی، مصرف بهینه و پایدار منابع (آب- غذا- انرژی) را برای انتخاب و اجرای سیاست‌ها مورد توجه قرار دهند. توجه به سیاست‌گذاری مستقل در هر کدام از سامانه‌های آب- غذا- انرژی و محیط‌زیست خطا بوده و تبعات جدی برای جوامع جهانی به‌دنبال خواهد داشت. تنها زمانی یک سیاست پایدار خواهد بود که بتواند در چارچوب تلفیقی آب- غذا- انرژی و محیط‌زیست بنا نهاده شود. بطور کلی در رویکرد تک‌بعدی به دلیل عدم انسجام سیاسی و پایین بودن بهره‌وری در استفاده از منابع، سبب ایجاد و پررنگ‌تر شدن رویکرد همبست شده است، و به کمک رویکرد همبست می‌توان امنیت همه جانبه منابع آب- انرژی- غذا را که توأم با دسترسی پایدار و عادلانه به منابع است را ارتقا بخشید. لذا برای جلوگیری از ارائه و اجرای سیاست‌های نامناسب تک‌بعدی، رویکرد همبست که کلیه ابعاد و عوامل موثر بر توسعه پایدار را بصورت سیستمی و با چارچوبی جامع و گسترده در برگیرد مفید خواهد بود. با در نظرداشتن اینکه منشأ عمده چالش‌های جهانی و ملی، ناکارآمدی و ناهمگرایی سه سامانه آب- غذا- انرژی شناخته شده است، بنابراین بنیان سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی توسعه پایدار در تلفیق و یکپارچه‌سازی این سه سامانه می‌باشد. در این راستا پیشنهاد می‌شود از رویکرد همبست بعنوان راه‌حل جدید و مؤثر برای مواجه با مشکلات و مسائل اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی در ارائه سیاست‌گذاری‌های توسعه و مدیریت منابع استفاده شود.

در راستای نتایج حاصل از مطالعه پیشنهادات زیر ارائه شده است:

نتایج مدل‌سازی رویکرد همبست آب- غذا- انرژی نشان داد، با بکارگیری رویکرد همبست آب- غذا- انرژی، سطح زیرکشت محدوده مطالعاتی ۳۸/۴۸ درصد، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۴۰ درصد، آب‌آبیاری ۲۵/۸ درصد و انرژی مصرفی ۵۳/۱۱ درصد کاهش یافت. بنابراین در راستای اجراء سیاست‌های توسعه و تعادل‌زیستی بکارگیری رویکرد همبست آب- غذا- انرژی در راستای حفاظت از محیط‌زیست و مدیریت منابع پیشنهاد می‌شود.

با توجه به کاهش سطح زیرکشت محصولات گندم، یونجه، گوجه‌فرنگی، چغندرقند، پیاز و خیار در الگوی چندهدفه برای تأمین امنیت‌غذایی جامعه می‌توان از طریق کشت فراسرزمینی یا تهیه طرح آمایش سرزمین و اجرای دقیق آن گام برداشت. راهکارهایی از جمله جایگزینی کشت محصولات با توجه به پتانسیل سازگاری آن‌ها و مصرف نهاده‌ها (آب، انرژی، کود و سم) متناسب با وضعیت منابع هر منطقه، شناسایی بخش‌ها و مناطق مناسب برای کشت محصولات خاص در هر منطقه، در نهایت الگوهای کشت بهینه بر مبنای محدودیت منابع آب، انرژی و امنیت غذایی اجرا شود.

به دلیل اینکه در رویکرد همبست آب- غذا- انرژی همه اجزاء مختلف اقتصادی، اجتماعی، فنی و زیست‌محیطی ادغام و در ارتباط با هم مدنظر قرار می‌گیرند، بنابراین استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه در این امر بسیار حائز اهمیت است. پیشنهاد می‌شود که از سایر الگوریتم‌های حل مسایل چند هدفه مانند الگوریتم‌های فراابتکاری در مطالعات آینده استفاده شود.

از دیگر نتایج مطالعه افزایش سطح زیرکشت ذرت و جو در مشهد در الگوی برنامه‌ریزی چندهدفه بود. با توجه به اینکه سطح زیرکشت این محصولات در هدف حداقل‌سازی انتشارگازهای گلخانه‌ای افزایش یافته است، بنابراین توصیه می‌شود با تغییراتی در الگوی کشت فعلی این محصولات استراتژی به سمت تولید محصولاتی با اثرات کمتر بر محیط‌زیست از جمله گندم، یونجه و پیاز تغییر داده شود. در این‌صورت علاوه بر افزایش سود ناخالص کشاورزان در عین حال از آسیب‌ها و پیامدهای مخرب زیست محیطی جلوگیری خواهد شد.

منابع

1. Agricultural Jihad Organization. (2020). Unpublished result, Khorasan Razavi.
2. Azamirad, M., Ghahreman, B., & Esmaili, K. (2018). Investigation flooding potential in the Kashafrud watershed, Mashhad the method SCS and GIS. *Journal of Watershed Management Research 9*(17): 26-38. (In Persian with English abstract)
3. Bagheri, A. (2018). *Water resources management with water, energy and food linkage approach*. The first international conference on water consumption management, demand and efficiency. (In Persian with English

abstract)
4. Buysse, J., Van Huylenbroeck, G., & Lauwers, L. (2007). Normative, Positive and Econometric Mathematical Programming as Tools for Incorporation of Multifunctionality in Agricultural Policy Modelling. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120: 70-81. https://doi .org /10.1016/j.agee.2006.03.035.
5. Chai, J., Shi H., Lu Q., & Hu, Y. (2020). Quantifying and predicting the Water-Energy-Food-Economy-Society-Environment Nexus based on Bayesian networks - A case study of China. *Journal of Cleaner Production*, 256: 120266. DOI: https://doi .org/ 10 .1016 /j.jc lepro .2020. 120266
6. Chiun, L.P., & Hwong, W. (2020). Evaluating the environmental impacts of the water-energy-food nexus with a life-cycle approach. *Resources, Conservation and Recycling* 157: 104789. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104789.
7. Davari, K., Shahedi, M., Talebi, F., Khazaei, S., Omranian, H., Fakhar, M., & Majidi, N. (2016). *Water book of Khorasan Razavi province*, Hedro Tak Tuse Mashhad.
8. Emamzadeh, S.M., Forghani, M.A., Karnema, A., & Darbandi S. (2016). Determining an optimum pattern of mixed planting from organic and non-organic crops with regard to economic and environmental indicators: A case study of cucumber in Kerman, Iran. *Information Processing in Agriculture* *3*(4): 207-214. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.001.
9. Esteve, P., Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., & Downing, T.E. (2015). A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture. *Ecological Economics* 120: 49-58. https:// doi. Org /10. 101 6/ j. ecolecon .2015.09.017.
10. Esmaeilzadeh, S., Asgharipour, M.R., & Khoshnevisan, B. (2020). Water footprint and life cycle assessment of edible onion production-A case study in Iran. *Scientia Horticulturae* 261: 108925. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.001.
11. Eslami, Z., Janatrostami, S., & Ashrafzadeh, A. (2019). Application of modeling in management of water, energy, and food Nexus, *Journal of Water and Sustainable Development* *6*(2): 1-8. (In Persian with English abstract)
12. Fabiani, S., Vanino, S., Napoli, R., & Nino, P. (2020). Water energy food nexus approach for sustainability assessment at farm level: An experience from an intensive agricultural area in central Italy. *Environmental Science & Policy* 104: 1-12. https://doi .org/10 .10 16/j. envsci.2019.10.008.
13. Hoff, H. (2011). Understanding the NEXUS. Background paper for the Bonn, nexus conference: The water, energy and food security nexus solutions for the green economy. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
14. Kalbali, E., Ziaee, S., Mardani Najafabadi, M., & Zakerinia, M. (2021). Approaches to adapting to -impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrogy-Economics model. *Journal of Cleaner Production* 280: Part 1, 124067. https://doi.org/10.1016 /j.jclepro .2020.124067.
15. Karabulut, A.A., Crenna, E., Sala, S., & Udias, A. (2018). A proposal for integration of the ecosystem-water-food-land-energy (EWFLE) nexus concept into life cycle assessment: A synthesis matrix system for food security. *Journal of Cleaner Production* 172: 3874-3889. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.092.
16. Keyhanpour, M.J., Mousavi-Jahromi, S.H., & Ebrahimi, H. (2021). Dynamic analysis of sustainable water resources management based on water-food-energy Nexus case study: Khuzestan province, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* *3*(15): 567-581. (In Persian with English abstract). https://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.3.8.2.
17. Mardani Najafabadi, M., Ziaee, S., Nikouei, A., & Borazjani, M.A. 2019. Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems*, 173: 218-232. DOI: https://doi.org/10. 1016/j.agsy.2019.02.006
18. Mirabi, M., & Krabi, M. (2019). *Integrated modeling in the optimal management of water, energy and food resources with a correlated approach*, 11th National Congress of Civil Engineering, Shiraz. (In Persian with English abstract)
19. Mo, li., Qiang, F., Vijay, P.S., Yi, j., Dong, L., Chenglong, Z., & Tianxiao, L. (2019). An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty. *Science of the Total Environment* 651: 1416-1434. https://doi.org/10.1016/j. scitotenv.2018.09.291.
20. Monem, M.J., Delavar, M., & Hosseini, S.M. (2019). Application and evaluation of water, food and energy (NEXUS) in irrigation Networks management: case study of Zayandehrud irrigation Network, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage 1*(14): 275-285. (In Persian with English abstract)
21. Marzban, Z., Asgharepour, M.R., Ghanbari, A., Nikouei, A.R., Ramroudi, M., & Seyed Abadi, E. (2020). Reducing environmental effects by redesigning the cultivation pattern with the approach of using cycle assessment Life and Multipurpose Planning (Case Study: East of Lorestan Province), *Scientific knowledge of Agricultural Knowledge and Sustainable Production 30*(3): 311-330. (In Persian with English abstract)
22. Nie, Y., Avraamidouc, S., Xiaoa, X., Efstratios, N. P., Jie, L., Yujiao, Z., Fei, S., Jie, Y., & Min, Z. (2019). A Food-Energy-Water Nexus approach for land use optimization. *Science of the Total Environment* 659: 7-19. https://doi .org /10.1016 /j. scitotenv.2018.12.242.
23. Pu, R.Y., Sang-Hyun, L., Jin, Y.C., Seung-Hwan, Y., & Seung-Oh, H. (2022). Analysis of climate change impact on resource intensity and carbon emissions in protected farming systems using Water-Energy-Food-Carbon Nexus, *Resources, Conservation & Recycling* 184: 106394. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106394.

24. Qin, J., Duan, W., Chen, Y., Dukhovny, V.A., Sorokin, D., Li, Y., & Wang, X. (2022). Comprehensiveevaluation and sustainable development of water–energy–food–ecology systems in Central Asia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 157: 112061. https://doi.org/10 .10 16/j.rser.2021.112061.
25. Report on integrated management of water resources in Kashfarud Basin. 2009.
26. Sharifi Moghadam, E., & Sadeghi, S.H.R. (2018). Application of Water-Energy-Food Correlation in Water Resources Management, the First National Conference on Water Resources Management Strategies and Environmental Challenges. (In Persian with English abstract)
27. Safaei, V., Pourmohammad, Y., & Davari, K. (2020). Interconnected Approach to Water, Energy and Food in Water Resources Management (Case Study: Mashhad Area), *Iranian Journal of Irrigation and Drainage 5*(14): 1721-1708. (In Persian with English abstract)
28. Safavi, A., & Ehteshami, M. (2022). Modeling the correlation approach of water, energy and food and evaluating its social and environmental sustainability (Case study: Varamin city). *Scientific Journal of Hydroelectric Dam and Power Plant 8*(28): 101-80. (In Persian with English abstract)
29. Tichenor, N.E., Van Zanten, H.H., de Boer, I.J., Peters, C.J., Carthy, A.C., & Griffin T.S. (2017). Land use efficiency of beef systems in the Northeastern USA from a food supply perspective. *Agricultural Systems* 156: 34-42. https://doi.org /10.1016/j.agsy .2017. 05 .011.
30. Wicaksono, A., & Kang D. (2019). Nationwide simulation of water, energy, and food nexus: Case study in South Korea and Indonesia. *Journal of Hydro-environment Research* 22: 70-87. https://doi.org/10.1016/j.jher.2018.10.003.
31. West, J. (2019). Multi-criteria evolutionary algorithm optimization for horticulture crop management. *Agricultural Systems* 173: 469-481. https://doi.org/10.1016/j.agsy. 2019. 03.016.
32. Yu, L., Xiao, Y., Zeng, X.T., Li, Y.P., Fan, Y.R. (2020). Planning water-energy-food nexus system management under multi-level and uncertainty. *Journal of Cleaner Production* 251: 119658. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119658.
33. Zhang, X., & Vesselinov, V.V. (2018). Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. *Advances in Water Resources* 101: 1–10. https://doi.org/10. 1016/j.intimp.2017.10.002.